

Eléments de prospective technologique pour une Révolution Doublement Verte

Résultats de la consultation des comités scientifiques du CIRAD

(amélioration des plantes, défense des cultures, technologie, économie-sociologie)

Michel Griffon

Le concept de Révolution Doublement Verte a été imaginé (Conway, 1994) afin de faire face aux nouveaux risques qui émergent en matière d'alimentation, de pauvreté et d'environnement que différentes études de prospective ont identifiés (Rosegrant, 1995 ; Alexandratos, 1995 ; Mitchell, 1993 ; Griffon, 1994). Il s'agit aussi de dépasser le concept de Révolution Verte dont l'application a eu des résultats positifs en matière de production d'une exceptionnelle importance, mais qui rencontre en Asie de plus en plus de limites : pollution chimique, salinisation des sols irrigués, plafonnement des rendements.

De même que la Révolution Verte a été à la fois un ensemble de techniques ainsi qu'une politique économique et institutionnelle forte, la Révolution Doublement Verte comportera aussi ces trois grands aspects.

L'objet de cette note est de faire le point d'une manière prospective sur les techniques de la Révolution Doublement Verte. Elle s'inspire des débats qui ont eu lieu au cours de l'année 1995 lors des séances des divers Comités Scientifiques du CIRAD⁽¹⁾

Définitions préalables

La Révolution Doublement Verte

Tout d'abord, qu'est-ce que la Révolution Doublement Verte ? G. Conway et al. en décrivent ainsi les objectifs : "Pour les trois décennies à venir, elle doit répéter les

(1) Comité scientifique de la MICAP, Mission Amélioration des plantes, 6 avril 1995. Comité Scientifique de la MIDECA, Mission Défense des Cultures, 30 mai 1995. Réunion des Chargés de Missions, 29 juin 1995, Comité Scientifique de la MES, Mission Economie et Sociologie, 30 juin 1995, Comité Scientifique de la MITECH, Mission Technologies, 11 juillet 1995.

succès de la Révolution Verte à l'échelle mondiale dans la diversité des sites concernés. Elle doit être équitable, durable et respectueuse de l'environnement. La première Révolution Verte avait entrepris de produire de nouvelles variétés à haut rendement. Ce n'est que par la suite qu'elle s'est interrogée sur le bénéfice que pourraient en tirer les pauvres. La nouvelle révolution doit renverser cette logique en partant de la demande socio-économique des ménages pauvres, puis en cherchant à identifier les priorités de recherche. Elle admet en substance pour objectifs :

- i) la sécurité alimentaire ;
- ii) la création de revenus et d'emplois ;
- iii) la conservation des ressources naturelles et de l'environnement.

On attend d'elle en particulier la création de moyens d'existence locaux durables pour les pauvres" (Conway et al., 1994).

On retiendra pour ce qui concerne la réflexion sur les techniques agricoles que les systèmes productifs devront avoir une productivité physique accrue et ceci d'une manière viable écologiquement, techniquement, économiquement et socialement. On s'intéressera ici aux aspects écologiques et techniques de la viabilité.

La viabilité d'un écosystème de production peut être définie comme un fonctionnement de l'ensemble des cycles biologiques dans des conditions telles qu'il y a renouvellement permanent de ses structures et de ses fonctions, de sorte que le potentiel de production soit maintenu et que l'on n'obère pas sa production future. Les évolutions de l'écosystème de production peuvent ne pas être viables en raison de processus de dégradation réversibles ou non. Le domaine de viabilité de la dynamique du système est l'ensemble des états pour lesquels le régime de renouvellement est assuré pour une durée déterminée et pour lesquels il y a une capacité de résistance face aux aléas connus (Griffon, 1995). Les indicateurs de viabilité écologique sont donc avant tout des indicateurs de renouvellement des éléments constitutifs des cycles biologiques qui caractérisent les écosystèmes de production. Cette conception amène à ne pas isoler le système de production de l'écosystème. Elle amène à considérer l'agronomie et la zootechnique comme s'inscrivant dans un cadre de raisonnement plus général, celui de l'écologie opérationnelle qui est elle même une branche de l'écologie scientifique.

Les milieux écologiques de la Révolution Doublement Verte

De même qu'il y a une géographie de la Révolution Verte, il devrait y avoir une géographie de la Révolution Doublement Verte.

Pour la Révolution Verte, les milieux concernés sont avant tout les milieux à haut potentiel de production : surtout les plaines irriguées d'Asie, mais aussi les savanes tropicales d'Amérique Centrale et d'Afrique. Elle a été étendue sans suc-

cès dans les zones plus marginales du point de vue du potentiel productif : zones à pluviosité plus réduite ou zones de pentes.

Pour la Révolution Doublement Verte les priorités géographiques sont définies par le critère de pauvreté des populations, et le critère des risques environnementaux. Trois grands types de zones sont concernés.

- i) Les zones de terres neuves et de fronts pionniers où la tendance naturelle des populations est d'utiliser le plus possible la rente de productivité naturelle existante qui s'épuise rapidement ; c'est le cas pour les fronts pionniers de zone tropicale humide ou de zone tropicale sub-humide.
- ii) Les zones où il n'y a jamais eu de Révolution Verte et où l'accroissement des besoins alimentaires requiert un accroissement de productivité. Dans un bon nombre de cas, la problématique sera celle d'une réduction de la jachère. Cela concerne des zones tropicales humides, sub-humides, sèches et méditerranéennes.
- iii) Les zones où a été appliquée la Révolution Verte ou des formes proches et où il y a eu des conséquences négatives pour l'environnement.

Concernant l'élevage, on peut considérer qu'il y a aussi trois types de cas :

- i) Elevage extensif avec non renouvellement de la biomasse fourragère, en particulier les zones du type sahélien et les espaces sylvo-pastoraux méditerranéens.
- ii) Elevage intégré à l'agriculture en voie d'intensification, en particulier dans les zones tropicales sub-humides et sèches.
- iii) Elevage intensif entraînant des conséquences négatives sur l'environnement, en particulier en zone périurbaine.

Notons qu'en l'absence de système de prix unifiés sur tout un territoire national, les coûts de transport déterminent une géographie des incitations à produire et à intensifier. Dans les zones proches des centres de consommation et de stockage, les agriculteurs et les éleveurs peuvent obtenir de bons prix pour vendre leurs produits et acheter leurs intrants. Les hinterlands sont ainsi les zones où l'intensification est la plus probable, mais aussi où l'on rencontre les risques qui s'attachent à l'intensification. A contrario, les zones lointaines obtiendront de bas prix pour les ventes de produits et les coûts d'intrants seront élevés, ce qui incitera à exploiter la rente de fertilité du milieu au risque de l'épuiser (Ninnin, 1994).

La gestion de la fertilité du milieu

Par fertilité, on entendra le potentiel productif des écosystèmes de production. Ce potentiel est compatible avec un domaine de viabilité donné et un régime donné de renouvellement des structures et des fonctions de l'écosystème de production.

La fertilité résulte donc de l'état de viabilité du milieu et de son régime de fonctionnement. On ne peut pas l'expliquer uniquement par le stock d'éléments nutritifs du sol car elle est le produit de l'ensemble des éléments de l'écosystème de production.

On peut identifier différents sous-domaines de gestion de la fertilité :

- La préparation et l'occupation du sol.
- La gestion du profil cultural.
- La gestion des éléments nutritifs minéraux.
- La gestion de la matière organique.
- La gestion de la compétition entre plantes (écophysiologie).
- La gestion du patho-système.
- La gestion du calendrier du travail.

Pour chacun de ces domaines il existe, comme nous allons le voir, une conception de la gestion qui est spécifique à la Révolution Doublement Verte. L'ensemble créé une conception particulière de l'agronomie.

Une agronomie pour la Révolution Doublement Verte

La Révolution Verte cherche à constituer un système de production se substituant à l'écosystème existant. Une partie du milieu originel est ainsi artificialisée. L'objectif est d'accéder à une maîtrise poussée du système de production en recherchant le rendement qui soit à la fois le plus efficace en termes de rapport extrants/intrants et le plus élevé possible. Cela conduit à devoir contenir, à l'interface entre le système de production et l'écosystème environnant, la pression de ce dernier : par exemple, émission de graines d'adventices, parasitisme tellurique, déficits et excédents d'eau... C'est une logique de substitution à la nature qui conduit à un "affrontement" avec elle afin de la "contenir" (Henry, 1987).

La Révolution Doublement Verte cherche au contraire à tirer le meilleur parti des écosystèmes existants en ne les modifiant que progressivement, au rythme de la progression des besoins, en respectant les lois de renouvellement de leur fertilité. On ne cherche donc plus à installer un système de production simple en substitution à l'écosystème, mais à utiliser l'écosystème existant que l'on considère alors comme écosystème de production. C'est une logique qui ne cherche plus à "affronter et contenir", mais à gérer la nature en intelligence avec son fonctionnement, en "connivence" avec elle de manière à "l'embaucher" (Henry, 1987). C'est ce que de nombreuses sociétés ont fait dans leur histoire faute d'avoir les moyens d'artificialiser très rapidement et massivement les écosys-

tèmes sans toutefois toujours y parvenir⁽²⁾. Aussi, l'idée de gérer la production agricole en intelligence avec les écosystèmes n'est-elle pas nouvelle mais on peut la renouveler par l'apport d'une conception scientifique. Cette conception devrait avoir des conséquences importantes dans la gestion du milieu.

Occupation du sol

Le principe d'occupation du sol répond à la nécessité d'associer différentes cultures dans l'espace et dans le temps dans différents buts :

- Que toutes les espèces soient recherchées pour leur utilité directe (production) et/ou indirecte (effet utile sur le milieu ; par exemple les plantes fixatrices d'azote) ; on n'a alors pas à gérer le problème de la pression des adventices,
- que l'association soit synergique : recyclage par les racines profondes des arbres des éléments nutritifs lessivés, création d'un ombrage à effet micro-climatique favorable, maintien d'un certain niveau d'humidité...,
- que la couverture permanente du sol contribue à limiter l'érosion.

Préparation du milieu

L'installation de cultures pures amène souvent à préparer un sol nu par brûlis, défrichage ou labour. Le modelage d'un couvert végétal avec association de culture amène à traiter au contraire le milieu sélectivement.

Gestion du profil cultural

Classiquement, le travail du sol destiné à créer un profil cultural est réalisé à partir d'instruments permettant :

- De créer ou restaurer une capacité hydrique,
- de faciliter l'installation des racines,
- de détruire les horizons de compaction,
- d'enfouir la matière organique,
- de réduire les adventices.

Une optique d'artificialisation limitée, mène à rechercher un travail minimum du sol.

(2) On cite souvent au début de la période historique la stérilisation des sols irrigués de Mésopotamie, et la désertification des parcs proches du Nil, la difficulté des Romains d'éviter la désertification du Maghreb, et plus récemment la régression économique du Yucatan Maya.

Gestion de l'eau et de l'humidité

En irrigation classique, le principe est de sécuriser au maximum les apports d'eau en utilisant le climat comme source d'appoint. Dans l'hypothèse inverse, les apports d'eau sont conçus comme complément du climat.

En agriculture pluviale, classiquement la constitution de réserves d'eau se fait par le travail du sol (labour, sarclage pour casser la capillarité de surface). D'autres méthodes peuvent être utilisées pour conserver l'humidité du sol : le maintien d'un couvert végétal, l'utilisation de mulchs naturels et artificiels.

Gestion de la fertilité minérale

Elle peut se faire en privilégiant l'apport d'engrais minéraux. Elle peut aussi se faire, en diversifiant les sources :

- recyclage des résidus de récolte, des écarts de triage compostés, apport de compost de déchets urbains, apports de déjections animales,
- utilisation de plantes fixatrices d'azote (voir encadré 1) et de phosphore, utilisation de nouveaux engrais ou de nouvelles formulations : engrais organiques issus des élevages industriels et reconditionnés, engrais libéré en fonction des conditions de température et d'humidité (micro-encapsulation)

ENCADRE 1

Sources d'azote biologique par symbiose entre plantes et micro-organismes

- Légumineuses annuelles fixatrices d'azote avec *Rhizobium* : *Pisum*, *Medicago*, *Sesbania*, *Phaseolus*, *Arachis*.
- Arbres légumineux : *acacia*, *arkinsonia* (en zone sèche) avec *Rhizobium*.
- Azolle dans les champs de riz avec *Anabaena*
- Plantes non légumineuses avec *Frankia*
- Canne à sucre avec *Azospirillum*

- apports très fractionnés afin d'éviter le lessivage et les pertes atmosphériques (azote)
- récupération et recyclage des nutriments migrant en profondeur par les racines profondes.

Gestion de la matière organique

Elle peut se faire classiquement par des apports complémentaires, souvent onéreux en raison du poids à transporter. On peut aussi reconstituer progressivement la matière organique en favorisant l'humidification par des conditions d'humidité

et de température favorables que l'on peut obtenir par des mulchs ou des écosystèmes de production agro-forestiers.

Gestion des adventices

La tendance de l'agriculture modernisée est d'utiliser des herbicides ou un sarclage mécanique. Dans l'autre optique, les adventices sont empêchées par la compétition avec d'autres plantes cultivées, ce qui n'empêche pas l'utilité des herbicides.

Gestion du patho-système (biotope et biocénose parasitaire)

La tendance modernisatrice a pendant longtemps abouti à augmenter le nombre des interventions de traitement phytosanitaire. Mais depuis longtemps aussi, des alternatives ont été recherchées :

- la lutte biologique : utilisation de prédateurs et parasites ennemis des ravageurs ;
- la lutte génétique : production de variétés résistantes aux maladies et ravageurs ;
- la lutte intégrée : utilisation de l'ensemble des méthodes en réduisant le plus possible l'usage de biocides (voir 4 infra).

Gestion du calendrier des travaux

La tendance principale est à la mécanisation afin de réaliser les opérations culturales dans les meilleurs délais (réduction de la durée des interventions) et aux moments les plus opportuns. La monoculture par ailleurs crée des pointes de travail dans le calendrier ce qui amène à mécaniser.

Dans des systèmes à nombreuses cultures et cultures associées, le calendrier de travail est plus étalé et les façons culturales moins aisément mécanisables mais des recherches pourraient démentir cette assertion. Cette option est cohérente avec le maintien d'un haut niveau d'emploi agricole en milieu rural.

Une conception intégrée autour du concept de système de culture

L'idée d'intégrer d'une part la gestion des sols et de la fertilité (encadré 2), et d'intégrer d'autre part la lutte contre les maladies et ravageurs amène à avoir une conception intégrée plus globale. Le concept de système de culture et le concept d'itinéraire technique (encadré 3) permet de raisonner cette gestion intégrée des interventions dans l'écosystème local (encadré 4).

ENCADRE 2

Gestion intégrée du sol

- 1 Travail du sol préservant la biomasse et la structure
Objectif : garder le plus possible de résidus sur le sol (mulch)
éviter l'érosion
- 2 Recyclage des éléments nutritifs
Objectif : éviter les pertes d'éléments nutritifs
Moyens : rotations et successions culturales appropriées,
associations de cultures (et agroforesterie) afin d'occuper les différents
étages du sol par le système racinaire,
mulchs
- 3 Lutte contre les mauvaises herbes
Objectifs : diminuer l'usage de pesticides
rendre le calendrier de travail plus flexible
Moyens : mulchs
cultures associées
- 4 Gestion d'unités de terroir
Objectifs : intégrer les interventions dans le cadre de l'écosystème cultivé local
Moyens : aménagements écologiques : haies, lutte anti-érosive,...

D'après C. Piéri. 1995. *Soil fertility Management for intensive agriculture in the humid tropics* Draft. et *Integrated soil management for the tropics*. BIRD/AGRTN n 7-Nov.1994

Une zootechnie adaptée à une Révolution Doublement Verte agricole

Il s'agirait de privilégier non plus des systèmes d'élevage en recherchant un haut niveau d'artificialisation de la production (nourriture, conditions de vie des animaux) mais des systèmes d'élevage plus compatibles avec les écosystèmes de production, et donc mieux intégrés. De nombreuses voies existent déjà : utilisation des animaux comme force de travail, déjections comme source de matière organique ou source de protéines alimentaires pour la pisciculture, comme source de travail, de revenu ou d'alimentation quotidienne dans une optique de sécurité, comme forme d'épargne là encore dans une optique de sécurité. De nouveaux types d'élevage à faible intensité de travail pourraient certainement être inventés pour utiliser la faune actuellement sauvage du tropique humide (gros rongeurs, tortues, poissons) ou du tropique sec (oiseaux coureurs).

De nouvelles orientations pour la génétique et l'amélioration des plantes ⁽³⁾

Etat des lieux

La plupart des plantes tropicales cultivées sont de culture ancestrale, à l'exception du palmier à huile, de l'hévéa et du caféier Robusta cultivés depuis environ un

(3) Résumé tiré de "Plantes d'hier, d'aujourd'hui et de demain". Dossier de la Mission Connaissance et amélioration des plantes (MICAP), préparé par M. Jacquot - CIRAD - 1995.

ENCADRE 3

Système de culture et itinéraire technique

Système de culture : ensemble des éléments du système (sol, eau, éléments nutritifs, plantes cultivées et adventices, maladies et ravageurs) et des relations entre ces éléments (de type écosystémique) au niveau d'une parcelle, que le décideur gère selon un itinéraire technique.

Itinéraire technique : ensemble d'opérations culturales ordonnées dans le temps. Un itinéraire technique est un choix de succession d'opérations culturales (types d'outils, caractéristiques techniques des opérations).

ENCADRE 4

REVOLUTION DOUBLEMENT VERTE
PRINCIPES TECHNIQUES / AGRICULTURE PLUVIALE

	Tendance "Révolution verte ou modernisation"	Tendance "Révolution doublement verte"
Occupation du sol	Cultures pures	Cultures associées
Préparation du milieu	Obtention d'un sol nu par brûlis, défrichage mécanique, herbicides	Garder une couverture végétale de manière sélective
Gestion du profil cultural	Travail du sol afin : - de constituer une capacité hydrique - faciliter l'installation des racines - enfouir la matière organique - réduire la compaction - constituer un lit de semences - réduire les adventices	Travail minimum afin d'économiser l'énergie et le temps de travail
Gestion de l'eau	Par le travail du sol	Par conservation de l'humidité due au couvert arbustif et au mulch
Gestion de la fertilité	Apports principalement minéraux	Diversification des sources : - recyclage des résidus - apports animaux - plantes fixatrices N et P - recyclage des nutriments migrant en profondeur par système racinaire - effets des mulchs et gestion de la micro-faune du sol - "nouveaux engrais" : déchets urbains,...
Gestion des adventices	- surtout herbicides - sarclages mécaniques	- réduction par la compétition des cultures associées - herbicides en complément
Gestion du pathosystème	- surtout par biocides	- lutte biologique - lutte intégrée
Gestion du calendrier et de la productivité du travail	- mécanisation et motorisation pour réduire la durée des interventions	- étalement du calendrier pour maintenir l'emploi - mécanisation par la réduction du risque
Gestion du risque (climatique, économique)	- spécialisation - recherche d'un optimum de productivité	- diversification - recherche d'un objectif intermédiaire dans des hypothèses d'environnement variées
Gestion de l'élevage dans le système de production	- élevage non obligatoirement intégré aux systèmes agricoles - recherche d'un optimum de productivité	- élevage intégré à l'agriculture comme : • force de travail. • source de fertilité. • activité valorisant le temps de travail disponible. • épargne

siècle. Elles ont connu à des périodes plus ou moins anciennes une large dissémination qui a engendré une grande variabilité adaptative. Celle-ci a subi une érosion mais se maintient encore. Globalement, l'utilisation de variétés sélectionnées peut encore être une exception. C'est le cas pour le palmier à huile, l'hévéa et le cotonnier, alors que les variétés locales sont très dominantes pour la plupart des plantes (céréales, caféier, cacaoyer, cocotier...)

Les objectifs de sélection, tels qu'ils sont

La recherche d'un rendement maximal a jusqu'à maintenant été l'objectif premier de l'amélioration. La résistance et la tolérance aux parasites sont par la suite devenus des priorités : la rouille du caféier dès 1900, le *Phytophthora* de l'ananas en 1914 et des agrumes en 1920, la cercosporiose du bananier en 1940, etc. L'amélioration de la physiologie et de l'architecture des plantes a été entreprise un peu plus tard : palmier à croissance en hauteur réduite, variétés naines de riz et de caféier, riz pluvial, etc. Pour les cultures commerciales, la qualité a toujours été un critère important : longueur de fibre pour le cotonnier, goût et aspect pour les agrumes et fruitiers.

Afin de mieux connaître la variabilité intra et intervariétale et sa répartition spatiale, la recherche a développé les études de polymorphisme par marquage biochimie et moléculaire sur de nombreuses espèces : riz, canne à sucre, sorgho, cotonnier, cacaoyer, hévéa... Cela a aussi conduit à conserver les ressources génétiques.

Les principales améliorations du potentiel de rendement ont été obtenues par la réalisation de variétés hybrides et la maîtrise de la multiplication végétative (notamment chez les espèces ligneuses). Les projets futurs sont attendus de la cartographie des génomes, la sélection assistée par marqueurs, la multiplication végétative par culture *in vitro*, l'haploïdisation et la transformation génétique.

L'objectif de la Révolution Doublement Verte

Cet objectif est défini par divers critères : obtenir des rendements plus élevés, en réduisant les coûts de production, en respectant l'environnement donc de manière viable et durable, ceci en s'intéressant aux écologies et aux milieux où la pauvreté est importante, c'est-à-dire en travaillant principalement les espèces qu'ils cultivent. La sélection devra donc avoir une approche multifactorielle.

La fourniture de variétés aux agriculteurs pauvres et dans les régions à potentialité de production limitée amène souvent à penser que ces variétés doivent être rustiques, ce qui laisse entendre plus simples. En réalité, elles sont génétiquement plus sophistiquées car elles nécessitent une grande efficacité en milieu pauvre alliée à des résistances aux stress et aux facteurs abiotiques du milieu que l'agriculteur ne peut contrôler. Les milieux concernés étant nombreux et variés, les réponses variétales devront être multiples.

Par ailleurs, la recherche devra porter sur des espèces plus nombreuses⁽⁴⁾. La tendance naturelle de la recherche est en effet de travailler sur un petit nombre d'espèces afin de capitaliser sur chacune les innovations scientifiques qui arrivent en continu. Dans les agriculture intensives et les milieux à haute productivité où il y a un petit nombre d'espèces performantes, cette conception est efficace. Dans les zones marginales à grande diversité écologique et faible capacité d'investissement, la recherche pourrait s'intéresser à d'autres espèces, en particulier à des cultivars locaux, mais en restant dans un premier temps dans les mêmes familles botaniques afin d'économiser du temps dans la mise au point.

L'effort de conservation de la diversité génétique est indispensable pour faire face au besoins de diversification des plantes alimentaires et au besoin d'introduction de caractères génétiques utiles.

Les variétés à proposer doivent avoir une bonne stabilité dans le temps (par exemple, des variétés de sorgho à cycle variable en fonction des disponibilités en eau) et dans l'espace compte tenu des hétérogénéités importantes du milieu, et même des micro-hétérogénéités dans les parcelles. Elles devront donc avoir des caractères de résistance aux agresseurs de type polygénique. Elles devront aussi présenter des caractères de résistance aux facteurs destructifs abiotiques notamment le vent et la sécheresse (encadré 5).

ENCADRE 5		
Révolution Doublement Verte et Génétique		
	Objectifs habituels	Objectifs en Révolution Doublement Verte
Espèces		S'intéresser aux plantes orphelines Diversifier les espèces
Variétés	Une ou quelques variétés privilégiées	Chercher des réponses variétales multiples Utiliser les variétés locales
Critères	Rendement maximum dans de bonnes conditions de milieu	Approche multifactorielle Stabilité du rendement dans le temps et l'espace face à la variabilité des conditions du milieu
Résistance au stress abiotiques	Pas de recherche	Objectif très important car le milieu est peu contrôlé par le producteur
Transgénèse	Très utilisée	Prudence : incidence de la dissémination dans les zones où cohabitent des espèces apparentées
Conservation des ressources	Indispensable à long terme	Indispensable rapidement afin de limiter l'érosion de la variété adaptative

(4) Par exemple : les céréales des zones sèches, le fonio, la quinoa des Andes, les fourrages tropicaux pour une révolution fourragère tropicale, les niébés, les taros, les ignames, les labiées-tubercules, les végétaux pour de nouveaux usages : courges produisant des fibres d'emballage, pommes de terres produisant des polymères, arbres de bocage et d'aménagement écologique, herbes fixatrices de sable, etc.

Enfin, il ne faut pas omettre qu'il reste nécessaire de poursuivre la recherche de rendements élevés pour les espèces vivrières principales cultivées dans les zones à haute productivité. Cela permet en effet, en approvisionnant la demande alimentaire sans cesse croissante, de réduire la pression sur les terres moins productives et plus fragiles.

Aussi, la génétique devrait-elle s'orienter simultanément dans deux directions produire des variétés répondant au mieux à l'intensification avec intrants, et des variétés moins exigeantes et plus stables dans leur environnement.

La confirmation des voies actuelles de recherche en défense des cultures : la lutte intégrée⁽⁵⁾

Les systèmes de culture peuvent être considérés comme des écosystèmes artificialisés où les populations de plantes cultivées sont génétiquement uniformisées et de ce fait rendues vulnérables dans leurs interactions avec leurs parasites et ravageurs. Des dégâts acceptables pour le maintien des populations d'une espèce sauvage ne le sont pas lorsqu'il s'agit d'assurer et de rentabiliser une récolte. Pour ces raisons les agricultures intensives ont utilisé toutes les ressources à leur disposition : des systèmes de culture limitant le développement des parents et ravageurs, les résistances des plantes, les organismes antagonistes ou parasites des ravageurs mauvaises herbes et parasites des plantes, des produits d'origine biologique ou chimique de plus en plus performants. L'optimisation de ces méthodes conduit à une lutte intégrée qui devrait être respectueuse de l'environnement.

La recherche sur les nouveaux produits rencontrent des limites importantes

L'utilisation des produits chimiques s'est généralisée pour la plupart des cultures donnant lieu à une commercialisation assurant leur rentabilité. Les limitations à leur utilisation étant les coûts, les risques écotoxicologiques, l'absence de produits utilisables contre les bactéries et les virus, et l'apparition de résistances chez les organismes cibles. Depuis l'utilisation de la bouillie bordelaise il y a une centaine d'années, les organochlorés, et des organophosphorés il y a une cinquantaine d'années, on a créé de nombreuses familles de produits plus efficaces, ce qui est demeuré l'objectif principal des recherches jusqu'en 1980. A cette époque l'objectif principal est devenu la recherche de molécules plus respectueuses de

(5) Résumé tiré de "Domaines de recherches stratégiques pour la lutte intégrée" de la Révolution Doublement Verte. Compte rendu du Comité scientifique de la Mission Défense des Cultures (MIDEC), préfacé par J.-L. Notteghem.

l'environnement. Des produits correspondant à ces objectifs ont été obtenus mais leur coût est souvent élevé, ce qui peut être compensé par des applications par traitements de semences. Le coût et la durée nécessaires au développement d'un nouveau produit est maintenant d'une moyenne de 400 à 500 MF sur 14 ans. De ce fait, les recherches sont concentrées sur un nombre limité d'objectifs correspondant aux grands marchés actuels ou potentiels des produits chimiques utilisés en agriculture. Un très petit nombre de ravageurs ou parasites tropicaux fait l'objet de recherches spécifiques (problème à rapprocher des objectifs des recherches de l'industrie pharmaceutique). Un nombre un peu plus élevé bénéficiera des retombées des tests de nouveaux produits sur des organismes qui n'étaient pas la cible initiale. Cependant, le coût d'une homologation est en augmentation du fait de l'évolution contraignante des législations qui sont une limitation importante à ces extensions. (S. Axiotis, 1995)⁽⁶⁾

Les recherches ont été longtemps basées sur le seul criblage de familles de produits de synthèse. Le développement des recherches sur les aspects moléculaires de la pathogénie des parasites apporte de nouvelles connaissances. Cette approche fortement développée pour les virus et les bactéries connaît maintenant des applications nombreuses sur les champignons (M.H. Lebrun, 1995)⁽⁷⁾. Pour ces derniers, les résultats sont attendus tant au niveau de l'identification de nouvelles cibles fongicides que de la possibilité d'utiliser de nouveaux gènes pouvant conférer une résistance aux plantes.

En 1990, plus de 500 espèces d'insectes étaient décrites comme résistantes à un insecticide. Ces résistances entraînent souvent une augmentation des doses et des fréquences de traitements. L'évaluation des niveaux de résistance est une première étape nécessaire à la gestion des populations de parasites. Mais la connaissance des mécanismes de résistance va maintenant jusqu'aux gènes et à leurs fonctions : travaux réalisés sur *Culex pipiens* (Nicole Pasteur, 1995)⁽⁸⁾. L'exemple de moustiques de complexe *Culex pipiens* offre de nouvelles perspectives d'étude des populations résistantes. L'existence d'une mutation extrêmement rare, qui s'est ensuite étendue à de nombreux territoires du fait de migrations favorisées par les activités humaines et de pressions de sélection favorisant la multiplication des populations résistantes, a conduit à leur extension à tous les continents. Ces études trouvent des applications évidentes dans la gestion des résistances des arthropodes, champignons et mauvaises herbes résistantes aux pesticides. Des recherches similaires sont utiles à la gestion des résistances à tous les produits utilisés qu'ils soient d'origine chimique ou biologique (*Bacillus thuringiensis*).

(6) Séminaire MIDEDEC opus cité : Axiotis S. Nouveaux objectifs pour la recherche de "pesticides"

(7) Séminaire MIDEDEC opus cité : M.H. Lebrun : Le pouvoir pathogène des champignons, analyse moléculaire des gènes de pathogénie de *M. grisea*

(8) Séminaire MIDEDEC opus cité : N. Pasteur : Les facteurs contrôlant l'évolution de la résistance aux insecticides

L'utilisation de la résistance génétique

La similarité est grande entre l'étude des dynamiques des populations d'organismes résistants aux pesticides et celle des populations de parasites ou ravageurs surmontant les résistances des plantes. L'analyse des populations de pathogènes des plantes est nécessaire à la mise en place de stratégies d'utilisation de variétés résistantes. L'analyse des structures génétiques de ces populations montre qu'elles sont souvent liées aux variations de pathogénie (M. Peterschmitt, 1995⁽⁹⁾ : Variabilité de la pathogénie des virus phytopathogènes. Analyses et perspectives - E. Roumen⁽¹⁰⁾ : Analyse de la population européenne de *M. grisea* et gestion des gènes de résistance). Les travaux réalisés au niveau de l'étude des épidémies observées dans les systèmes de culture actuels, permettent de tirer les conclusions sur la nécessité d'éviter l'accumulation de gènes de résistance dans une plante. Cette dernière méthode peut conduire à l'augmentation de la fréquence de souches virulentes et à leur persistance alors que les méthodes permettant l'association temporelle ou spatiale de gènes de résistance conduisent à une gestion durable de leur efficacité (C. Pope, 1995⁽¹¹⁾ : Analyse des populations de champignons phytopathogènes et gestion des gènes de résistance).

Ces travaux nécessitent des outils puissants d'analyse des populations et des outils de détection sensibles. Les tests immunoenzymatiques sont maintenant appliqués à un très grand nombre d'organismes, virus et bactéries essentiellement. La généralisation en zone tropicale de leur utilisation est un objectif actuel. L'utilisation d'outils moléculaires permet d'accéder à une plus grande spécificité et à une plus grande sensibilité, nécessaires à la compréhension des cycles des maladies virales, et bactériennes. Les recherches pour l'identification de ces outils sont en cours dans de nombreux laboratoires. (P. Rott, 1995⁽¹²⁾ : Diagnostic des maladies bactériennes, perspectives d'utilisation de méthodes moléculaires).

La gestion des gènes de résistance passe par une amélioration de connaissances de ces gènes. L'identification d'un nouveau gène et son évaluation représente un travail considérable. Aussi, les méthodes donnant accès à leur connaissance approfondie sont en cours de développement. Ces recherches portent à la fois sur les gènes de résistance et les gènes de virulence correspondants qui leur sont associés dans une relation gène pour gène. Les résultats du clonage des gènes de résistance ont connu un succès récent et une dizaine d'entre eux sont maintenant clonés (M. Dron, 1995⁽¹³⁾ : Les résistances monogéniques aux maladies chez les végétaux). On attend également de la cartographie de ces

(9) Séminaire MIDECE opus cité : M. Peterschmitt : Virus pathogènes. Analyse et perspectives

(10) Séminaire MIDECE opus cité : E. Roumen : Analyse de la population européenne de *M. grisea* et gestion des gènes de résistance

(11) Séminaire MIDECE opus cité : C. Pope : Analyse des populations de champignons phytopathogènes et gestion des gènes de résistance

(12) Séminaire MIDECE opus cité : P. Rott : Diagnostic des maladies bactériennes, perspectives d'utilisation de méthodes moléculaires

(13) Séminaire MIDECE opus cité : M. Dron : Les résistances monogéniques aux maladies chez les végétaux

gènes une simplification des méthodes d'identification de nouveaux gènes de résistance, ce travail sera utile au développement de stratégies d'utilisation de résistances monogéniques. L'analyse des liaisons entre marqueurs moléculaires et résistance peut permettre d'accéder à l'évaluation du rôle de segments génomiques dans la résistance partielle (QTL) (C. Lanaud, 1995⁽¹⁴⁾ : Cartographie des gènes de résistance chez les plantes pérennes tropicales - B. Clerget, 1995⁽¹⁵⁾ : La résistance du maïs aux viroses tropicales). Le premier objectif de ces travaux est certainement une meilleure connaissance du contrôle génétique de ces résistances. Dans la mesure où les méthodes d'utilisation des marqueurs se simplifieront et que leur coût sera abaissé, l'utilisation de ces QTL en amélioration variétale pourrait se généraliser.

La possibilité de la transformation génétique d'un nombre croissant d'espèces ouvre la possibilité de la création de cultivars dans lesquels on aura intégré des gènes de résistance. C'est pour la résistance aux virus que cette stratégie s'est le plus développée, mais de nombreuses tentatives sont en cours pour la résistance aux bactéries et champignons phytopathogènes. Pour ceux-ci, les résultats publiés ne font pas état de résultats déterminants, mais la diversification des recherches devrait rapidement aboutir à des voies de recherche prometteuses. Contre les virus, après l'accent mis sur l'utilisation du gène de la coque protéique virale, on assiste à l'expérimentation d'un grand nombre de méthodes dont l'utilisation d'autres gènes viraux et l'utilisation des gènes animaux exprimant des anticorps contre le virus des plantes. (T. Candresse, 1995⁽¹⁶⁾ : Stratégies to produce transgenic plants resistant to viruses). Les limitations sont de deux ordres, les risques biologiques dont les principaux apparaissent l'augmentation possible de la fréquence d'apparition de virus recombinants, et le contournement des nouvelles résistances. Les réflexions sur les stratégies d'utilisation des plantes transgéniques résistantes sont essentielles, elles rejoignent celles conduites sur l'utilisation des résistances monogéniques des plantes, et sur l'analyse des populations pathogènes et ravageurs et adventices des cultures, domaines de recherche qui sont certainement des plus importants pour les années à venir.

Les techniques à l'amont et à l'aval de l'agriculture

Les objectifs de la Révolution Doublement Verte ne s'adressent pas qu'au seul maillon agriculture-élevage de la chaîne de production alimentaire. Le secteur de l'agrofourniture est concerné : machinisme agricole, production d'engrais, production de produits phytosanitaires, équipement rural. De même, la stabilisation

(14) Séminaire MIDECE opus cité : C. Lanaud : Cartographie des gènes de résistance chez les plantes pérennes tropicales

(15) Séminaire MIDECE opus cité : B. Clerget : La résistance du maïs aux viroses tropicales

(16) Séminaire MIDECE opus cité : T. Candresse : Strategies to produce transgenic plants resistant to viruses

des produits, leur conservation et leur transformation ne doivent pas être omis. L'amont et l'aval de l'agriculture concourent à accroître la disponibilité alimentaire, à diversifier l'offre agricole, à créer des emplois ruraux et à limiter les atteintes de l'environnement.

La mécanisation du travail agricole

Les systèmes de culture avec associations de cultures (y compris l'agroforesterie) ne peuvent pas être mécanisés comme les systèmes en monoculture. Le travail en ligne reste la principale voie de recherche pour accroître la productivité du travail mais les associations ne permettent vraisemblablement pas d'envisager l'utilisation de machines à niveau élevé de puissance de traction. De même qu'il existe une mécanisation de montagne pour l'adaptation aux pentes et à l'étroitesse des chemins, de même que se développe une mécanisation adaptée au vieillissement des populations d'agriculteurs (Japon), on peut imaginer une mécanisation spécifiquement adaptée aux cultures associées. Elle devra respecter la contrainte de dimension réduite et de maniabilité. L'étalement des interventions culturales dans le temps ne devrait pas entraîner le recours à des puissances de traction élevées (qui permettent d'effectuer des travaux rapidement). L'exemple de l'utilisation de pulvérisateurs manuels à très bas volume pour le coton est significatif des possibilités de mécaniser de manière sélective certaines fonctions : le portage reste manuel et est permis par le très faible volume, mais la pulvérisation est électrique afin d'obtenir la dimension requise pour les micro-gouttes. Un effort de recherche important devrait être consacré au transport au sein des exploitations qui constitue souvent un facteur limitant important pour l'apport d'intrants et la récolte. La mécanisation des semis sous mulch est aussi un objectif important.

L'amont de l'agriculture

La Révolution Doublement Verte pourrait modifier la nature des demandes à d'autres secteurs de l'agrofourmiture : engrais, entreprises d'aménagement.

Concernant les engrais, les besoins en matière organique devraient s'accroître. En plus des ressources internes aux exploitations agricoles, d'autres sources peuvent être explorées. C'est le cas avec certaines recherches japonaises pour produire des amendements organiques à faible poids. Les déjections animales des grands élevages industriels peuvent être déshydratées par pression hydraulique, transformation d'effluents liquides d'élevage en engrais solide, dipollution du liquide (procédé "Transfiltre") pour l'irrigation et production de méthane pour l'énergie ; des filières de commercialisation importantes existent déjà en Europe (Truong Binh 1994). Les composts de déchets urbains des grandes villes tropicales constituent aussi une source très importante.

Pour les engrais minéraux azotés, il n'y a pas actuellement d'alternative industrielle permettant une production locale à coût réduit. Pour les phosphates, les

procédés de solubilisation par l'acide sulfurique des phosphates faiblement solubles à l'eau constituent une voie importante pour les sols africains.

Des innovations en matière de présentation des pesticides de manière à limiter le contact cutané seraient bienvenues : granulés auto-dispersibles dans des sachets autosolubles pour les rizières, "jumbo-granulés", goutte à goutte pour insecticides,...

Les entreprises d'aménagement rural (barrages, périmètres irrigués, réalisation d'aménagements anti-érosifs) sont généralement chargées de la réalisation complète des ouvrages. Des formules nouvelles apparaissent. Elles associent le travail manuel des populations locales et l'usage d'engins motorisés (sous-soleuses, bouteurs, transports par camions) en complément pour tout ce qui ne peut être manuel. Le travail des populations est un investissement qui est subventionné au titre de l'aide alimentaire.

La diminution des pertes après récolte

On estime souvent que ces pertes peuvent atteindre 10 % de la matière récoltée. Elles peuvent être dues à de mauvaises conditions de récolte, de stabilisation biologique du produit, à des attaques de maladies et ravageurs au stockage, à de mauvaises conditions de transformation, de commercialisation et quelquefois d'utilisation par les consommateurs.

Dans le domaine du stockage, on a trop souvent négligé de recenser les savoirs locaux qui peuvent être riches d'enseignements car héritiers d'une expérience longue.

Sur ces bases, des recherches pourraient être entreprises dans différents domaines pour améliorer :

- i) le séchage et la stabilisation des céréales et graines oléo-protéagineuses en conditions tropicales humides,
- ii) la protection des stocks de denrées périssables
- iii) la conservation des produits de mouture des grains
- iv) le séchage, la déshydratation et la conservation des fruits.

La transformation des produits par des petites entreprises

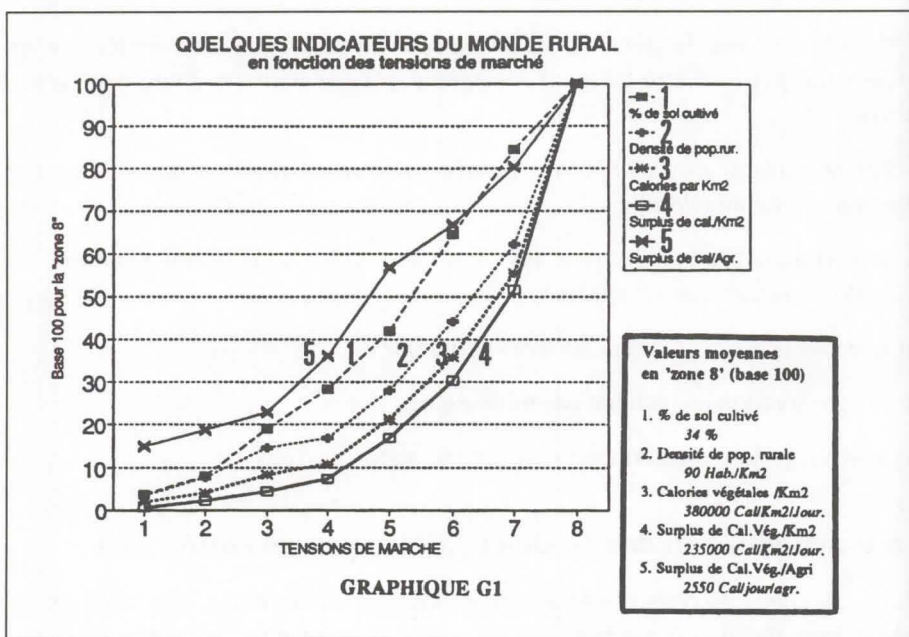
Dans les zones pauvres et enclavées, le développement d'une économie locale par la diversification des activités de transformation constitue un moyen de maintien de l'emploi. Ces petites unités de transformations produisent pour le marché local. Il s'agit de moulins à céréales, de presses à huile produisant également des tourteaux, production d'aliments du bétail,...

Des techniques nouvelles pourraient à l'avenir être proposées à des entreprises locales : déshydratation-imprégnation par immersion osmotique, conserverie, emballages comestibles ou dégradables biologiquement, panification de l'amidon de manioc, nouveaux aliments fermentés pour les sauces.

De nouvelles productions agricoles pour l'industrie : l'énergie, les carburants, le bois d'œuvre

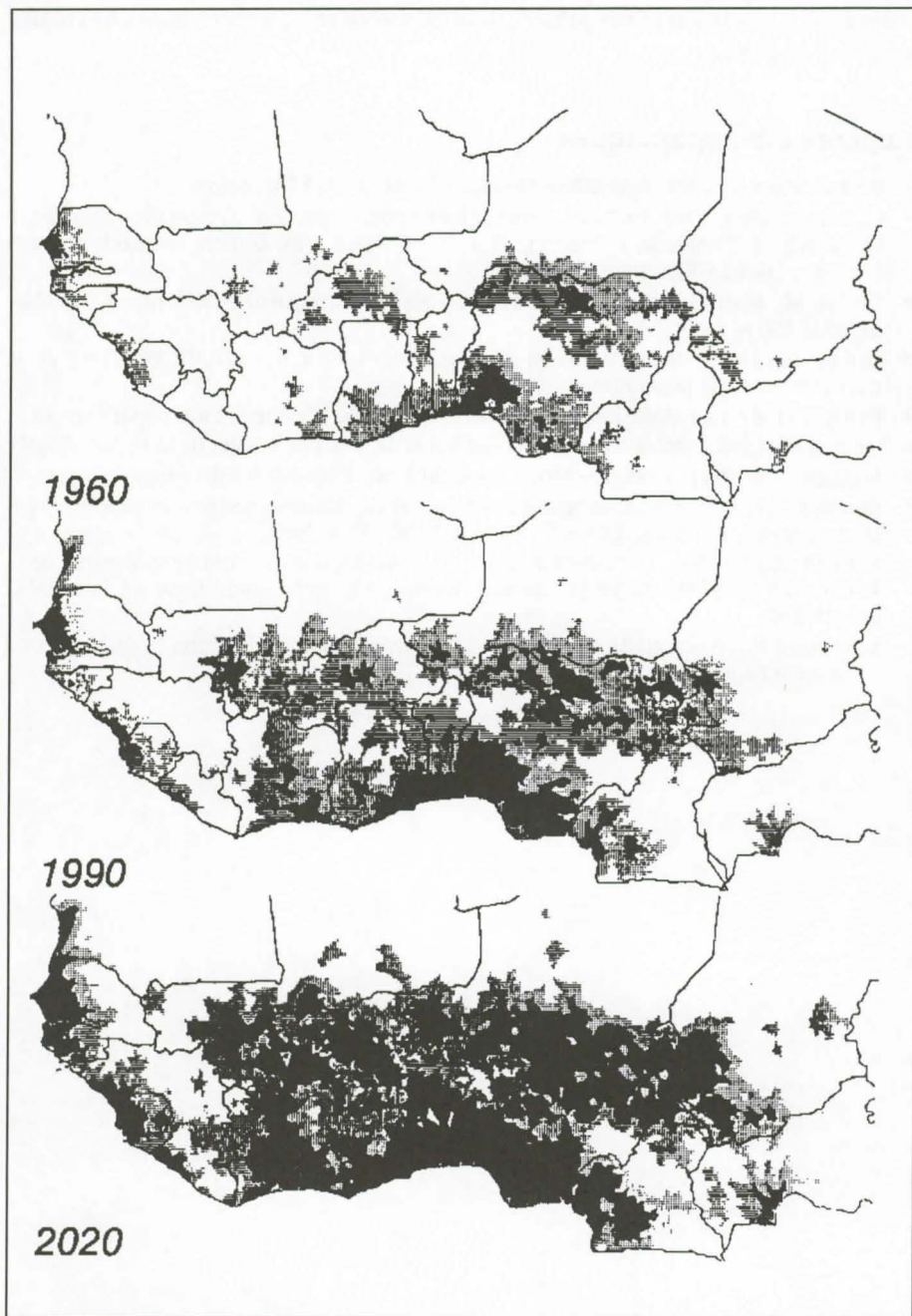
Les besoins alimentaires ne sont pas les seuls besoins essentiels qui s'accroissent avec la population. Les besoins en énergie pour la cuisine, en éclairage et en électricité locale sont importants ainsi que les besoins en carburants pour les transports, l'énergie motrice des petites industries ou pour la production d'électricité. La production de biomasse pour en extraire des carburants, ou la production de bois ne sont pas obligatoirement en concurrence avec la production alimentaire. Ils peuvent être synergiques dans le cadre des systèmes de culture (agro-foresterie, production d'oléoprotéagineux ayant différents usages). Ces produits non alimentaires sont aussi utiles pour diversifier les sources de revenu. La production de bois d'œuvre et de feu devient une activité rentable dans les zones où la végétation arborescente est devenue rare. La production de biocarburants (alcool,

Influence de la proximité des villes sur l'intensification agricole en Afrique de l'Ouest.



Source : Ninnin B. (1994). Economic Geography of West Africa ; Markets, Settlement patterns, Agriculture, Roads : Modeling for 1960-1990 - OECD-WALTPS, Paris

Carte de l'influence de la proximité des villes sur l'incitation à produire en Afrique de l'Ouest (Tension de marché).



Source : Ninnin B. (1994). Economic Geography of West Africa ; Markets, Settlement patterns, Agriculture, Roads : Modeling for 1960-1990 - OECD-WALTPS, Paris

ETBE, gaz, huiles, carburants) pourrait être envisagée comme substitut au gazole dans les zones enclavées (éloignement des villes, mauvaise qualité des infrastructures) ou dans les régions situées loin des routes commerciales principales (petites îles du Pacifique).

Repères bibliographiques

- Alexandratos N., 1995. Agriculture Mondiale-Horizon 2010-FAO-Rome
- Conway G. (ed.), 1994. Une agriculture durable pour la sécurité alimentaire mondiale. J. Holmberg, H. Carsalade, J. Peacock, U. Lele, M. Pineiro, M. Griffon, P. Hazell. Version française CIRAD-URPA, Paris.
- Griffon M., Marty I., 1994. Prospective des déséquilibres environnementaux - CIRAD-GERDAT-URPA. Paris.
- Griffon M., 1995. Modélisation du développement durable - CIRAD. Ministère de la Coopération. Paris (à paraître).
- Henry C., 1987. La nature, l'ingénieur et le contribuable - Document fourni par l'auteur.
- Jacquot M., 1995. Plantes d'hier, d'aujourd'hui et de demain. Dossier de la MICAP-CIRAD.
- Mitchell D. Ingco M., 1993. The World Food Outlook. BIRD-IED-Washington.
- Ninnin B., 1994. Economic Geography of West Africa : Markets, settlement patterns, agriculture, roads : modeling for 1960-1990- OECD WALTPS - Paris.
- Notteghem J-L., 1995. Domaines de recherches stratégiques pour la lutte intégrée de la Révolution Doublement Verte. Compte rendu du Comité scientifique de la MIDEDEC. CIRAD. Note
- Rosegrant M., Agcaoili M., Perez N., 1995. Global food projections to 2020. Vision Discussion Paper - IFPRI - Washington.